

Verwendung von Lithium-Verbindungen zur Realkalisierung von Beton

A. Gerdes* und C. Bissig⁺

* Institut für Baustoffe, ETH Zürich, Schweiz

⁺ Wolfseher und Partner AG, Adliswil, Schweiz

Zusammenfassung

Stahlbeton ist, je nach seiner Verwendung, verschiedenen Einwirkungen physikalischer und chemischer Natur ausgesetzt, die gesamthaft die Dauerhaftigkeit und damit auch die Nutzungsdauer eines Bauwerks massgeblich beeinflussen. Einer dieser Prozesse ist die Carbonatisierung von Beton, die häufig zum Auftreten von Bauschäden führt. Zur Instandsetzung dieser Betonbauteile sind Verfahren entwickelt worden, bei denen wässrige Lösungen von verschiedenen Lithium-Salzen auf die Betonoberfläche appliziert werden, um die Alkalität des Betons wieder zu erhöhen. Dabei geht man davon aus, dass im wiederhergestellten alkalischen Milieu des Betons der Stahl repassiviert und eine fortschreitende Korrosion dadurch verhindert wird. Die Ergebnisse einer Messreihe, bei der auf bewehrte Laborproben verschiedene Arten von Lithium-Verbindungen appliziert und anschliessend die Korrosionspotentiale und Tiefenprofile bestimmt wurden, werden vorgestellt und diskutiert. Die Aggressivität der verwendeten Lithium-Verbindungen wurde durch Experimente zur Spannungskorrosion zementgebundener Werkstoffe charakterisiert. Es wird gezeigt, dass die Lithium-Verbindungen bis auf eine Tiefe von 25 mm nachweisbar sind. Die Korrosionspotentiale haben sich in der Nähe der Oberfläche deutlich erhöht, was darauf hinweist, dass der Stahl nicht weiter korrodiert. Betonschädigende Reaktionen konnten nach der kurzen Versuchsdauer noch nicht nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig und werden derzeit durchgeführt.

Use of Lithium Compounds for Realkalisation of Concrete

Abstract

Normally, reinforced concrete is under physical and chemical loads, which influence the durability of concrete structures. Carbonation is one of these processes. Different techniques for realkalisation were developed to restore concrete structures. One method deals with the application of different types of lithium salt solutions on concrete surfaces to recover the alkalinity of concrete.

In the experiments, different types of lithium compounds were applied on the surface of reinforced mortar specimens. The corrosion potential and the penetration depth of lithium compounds were measured to characterise the action of the lithium compounds. The influence of lithium compounds on the durability of mortar was studied by stress corrosion tests.

It will be shown that lithium compounds can be detected 25 mm deep into the mortar. Near the surface, the values of corrosion potential increase significantly. Therefore, it can be expected that the steel corrosion due to the realkalisation has stopped. During the short testing period, no deterioration of the mortar due to the action of the lithium compounds can be observed. Further investigations are still in progress to verify the results and to develop the realkalisation with lithium compounds.



A. Gerdes, Studium der Chemie an der TU Clausthal. Diplomarbeit am Institut für Baustoffe der TU Clausthal über die Synthese und das Hydrationsverhalten von Calciumgermanaten. Seit 1990 Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der ETH Zürich. Hauptarbeitsgebiete sind die Dauerhaftigkeit zementgebundener Werkstoffe sowie die Verwendung von aufbereiteten Abfallstoffen in Werkstoffen des Bauwesens.

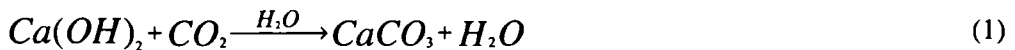


C. Bissig, 1968, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, nach dem Studium an der ETH Zürich einjährige Tätigkeit am Institut für Baustatik und Konstruktion als Assistent für Massivbau. Seit 1994 Mitarbeiter der Wolfseher und Partner AG als Projektleiter für Zustandsanalysen, Projektierung und Ausschreibung, sowie Bauleitung von Betonsanierungen

1. Einführung

Stahlbeton ist, je nach seiner Verwendung, verschiedenen Einwirkungen physikalischer und chemischer Natur ausgesetzt, die gesamthaft die Dauerhaftigkeit und damit auch die Nutzungsdauer eines Bauwerks massgeblich beeinflussen. Einer dieser Prozesse ist die Carbonatisierung von Beton, die häufig zum Auftreten von Bauschäden führt.

Bei der Umsetzung des Zementes mit Wasser wird als Bestandteil des Zementsteins in erheblichen Masse Calciumhydroxid gebildet, das im wesentlichen die Alkalität des Betons bestimmt. Bei der Carbonatisierung von Beton wird durch die Reaktion von Kohlendioxid aus der Atmosphäre mit dem im Beton vorhandenen stark basischen Calciumhydroxid zu schwach basischem Calciumcarbonat die Alkalität des Betons bis auf einen pH von 9 reduziert. Praktisch wird diese Abnahme durch Messung des pH-Wertes mit geeigneten Indikatoren verfolgt. In der folgenden chemischen Gleichung ist der komplexe Mechanismus vereinfacht dargestellt:



Durch die Reduktion des pH-Wertes wird die Passivierung des Bewehrungsstahles aufgehoben. Unter bestimmten Voraussetzungen korrodiert dann der Stahl mit den bekannten Folgen, wie der Verfärbung der Betonoberfläche durch Korrosionsprodukte und das Abplatzen des überdeckenden Betons. Schliesslich kann dieser Prozess bis zum Verlust der Standsicherheit des Bauwerkes führen. Für eine detaillierte Darstellung der Carbonatisierung und den damit verbundenen Folgen sei auf die weitergehende Literatur verwiesen [1-3].

Bei der herkömmlichen Instandsetzung eines carbonatisierten Bauteils wird in der Regel der Beton bis zur Bewehrung mechanisch abgetragen, die Bewehrung mit einem Korrosionsschutz versehen und anschliessend mit einem zementgebundenen Mörtel reprofiliert. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig und kostenintensiv. Manchmal ist der Abtrag des Betons auch aus Gründen des Denkmalschutzes unerwünscht. Deshalb sind in den vergangenen Jahren verschiedene Techniken zur Realkalisierung von Beton entwickelt worden, bei deren Anwendung die bestehende Betonoberfläche weitgehend erhalten bleibt. Diese Verfahren befinden sich aber noch überwiegend in der Erprobungsphase, teilweise wissenschaftlich begleitet.

Für einen technischen, aber auch wirtschaftlichen Erfolg dieser Realkalisierungsmassnahmen sind verschiedene Bedingungen zu erfüllen.

- Einfache Applikation
- Langanhaltende Wirksamkeit der Realkalisierung
- Verträglichkeit mit dem Beton (z.B. einsetzende Alkali-Silica-Reaktion)
- Vollständige Repassivierung des Stahls, da sonst die Gefahr von Lochfrasskorrosion besteht

Eines dieser Verfahren ist die elektrochemische Realkalisierung, auf die in diesem Beitrag nicht näher eingegangen wird, in [4], [5] und [6] aber ausführlich beschrieben ist.

Eine weiteres, technisch leicht ausführbares Verfahren ist das Applizieren alkalischer Lösungen auf die Betonoberfläche. Durch kapillares Saugen wird die alkalische Verbindung in den Beton transportiert, der pH-Wert der Porenlösung steigt wieder an. Dabei geht man davon aus, dass im wiederhergestellten alkalischen Milieu des Betons der Stahl repassiviert wird und eine fortschreitende Korrosion dadurch verhindert wird. Aufgrund der Zusammensetzung des Betons ist es naheliegend, Calciumhydroxid als alkalische Verbindung zu verwenden, da keine betonschädigenden Reaktionen zu erwarten sind. Durch die niedrige Wasserlöslichkeit ist die in den Beton transportierbare Menge an Calciumhydroxid (Löslichkeit ca. 2 g/l) aber relativ klein. Versuche, die mit Calciumhydroxid durchgeführt wurden, zeigten daher, dass die so realkalisierten Flächen binnen kurzer Zeit erneut carbonatisierten. Ohne flankierende Massnahmen, wie z.B. Anstriche oder Mörtel-Dickbeschichtungen, ist daher die Wirksamkeit dieser Massnahme zeitlich begrenzt.

Neben Calciumhydroxid sind auch andere alkalische Verbindungen bekannt, deren Carbonate aber, im Gegensatz zum Calciumcarbonat, aufgrund der vorliegenden chemischen Gleichgewichte hochalkalisch sind. Zu dieser Gruppe gehört das Lithiumcarbonat, deren wässrige Lösung einen pH-Wert von mehr als 11 aufweist.

Seit einigen Jahren werden daher in Japan [7] im Rahmen herkömmlicher Instandsetzungsmassnahmen wässrige Lösungen von Lithiumsilicat auf die freiliegende Bewehrung appliziert. Das schwerlösliche Lithiumsilicat zerfällt in der wässrigen Lösung in Lithiumhydroxid und amorphes Silicagel. Durch das Lithiumhydroxid wird der Beton realkalisiert, das amorphe Silicagel wirkt zusätzlich verfestigend. Nach dem Auftragen der wässrigen Lösung wird das Betonbauteil mit einem Instandsetzungsmörtel reprofiliert.

Sollte nach einem längeren Zeitraum der Mörtel erneut carbonatisieren, reagiert dabei das Lithiumhydroxid zu Lithiumcarbonat (Gleichung 2).



Durch die hohe Alkalität des gebildeten Lithiumcarbonats kommt es aber nicht zu einer Reduktion des pH-Wertes in der Porenlösung. Praktisch bedeutet das, dass trotz erneuter Carbonatisierung eine hohe Alkalität des Mörtels mit einem pH-Wert von ca. 12 gewahrt bleibt. Die Passivierung des Stahls wird somit nicht aufgehoben. Ausgehend vom oben beschriebenen Stand der Technik haben wir unter Verwendung verschiedener wässriger Lithium-Salzlösungen bewehrten Beton realkalisiert. Bei der Beurteilung dieses neuen Verfahrens müssen aber neben der langanhaltenden Wirksamkeit, die durch diese Gruppe von Verbindungen gewährleistet wird, noch weitere Aspekte berücksichtigt werden. Das Element Lithium gehört wie die Elemente Kalium und Natrium zu den Alkalimetallen. Von wasserlöslichen Kalium- und Natrium-Verbindungen ist bereits seit langem bekannt, dass sie im Beton bei Vorliegen reaktiver Zuschläge voluminöse Alkali-Silica-Gele bilden, die durch ihre treibende Wirkung binnen kurzer Zeit das Gefüge des Betons zerstören können. Die Reaktivität von Lithium-Verbindungen, vor allem bei hohen Konzentrationen in der Porenlösung, ist jedoch noch nicht hinreichend untersucht. Auch das Eindringverhalten der alkalischen Verbindungen ist von Bedeutung für den Erfolg einer Realkalisierung. Sollte partiell die Bewehrung nicht im realkalisierten Beton liegen, kommt es zur Bildung sogenannter Makroelemente [8]. Durch die dann vorliegenden elektrochemischen Reaktionsbedingungen kommt es zur ausgeprägten Lochfrasskorrosion mit den damit verbundenen Folgen. Es muss also sichergestellt sein, dass die Eindringtiefe und -menge eine Repassivierung aller Bewehrungsteile erlaubt. Daten zum Penetrationsverhalten von Lithium-Verbindungen liegen derzeit in nicht ausreichenden Masse vor.

Das Ziel dieser Untersuchung, deren erste Ergebnisse hier vorgestellt werden, ist es daher, die Wirksamkeit und die Verträglichkeit dieses Verfahrens unter Laborbedingungen zu überprüfen. Weiterhin sollen die Grundlagen für technische Richtlinien erarbeitet werden, die Voraussetzung für eine praktische Anwendung sind. Ergänzt wurden diese Experimente durch die Analyse einer Versuchsanwendung, die unter praxisnahen Bedingungen in einem öffentlichen Schwimmbad erfolgte.

2. Experimentelle Durchführung

2.1 Probenherstellung

Für die Untersuchungen wurden bewehrte Platten aus Mörtel mit einem W/Z-Wert von 0.55 bzw. 0.65 und den Abmessungen 925 x 320 x 60 mm³ hergestellt. Die genaue Zusammensetzung des Mörtels kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Als Bewehrung wurden bei der Herstellung dieser Probekörper 17 Gewindestangen aus Stahl mit einem Durchmesser von 3 mm eingelegt. Die Position der Bewehrung wurde so gewählt, dass die Stangen eine je um 2 mm grössere Ueberdeckung aufweisen. Im weiteren werden die einzelnen Bewehrungsstäbe, von der Oberfläche beginnend, mit 1-17 bezeichnet. Der Aufbau des Probekörpers ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper bis zur weiteren Verwendung im Laborklima gelagert.

| | Mörtel A [kg/m ³] | Mörtel B [kg/m ³] |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Portland Zement | 250 | 250 |
| Wasser | 137.5 (W/Z-Wert=0.55) | 162.5 (W/Z-Wert 0.65) |
| Zuschlag 0-4 mm | 1011 | 978 |
| Zuschlag 4-8 mm | 1011 | 978 |

Tabelle 1: Zusammensetzung der zwei verwendeten Mörtelarten

Table 1: Composition of the two types of mortar

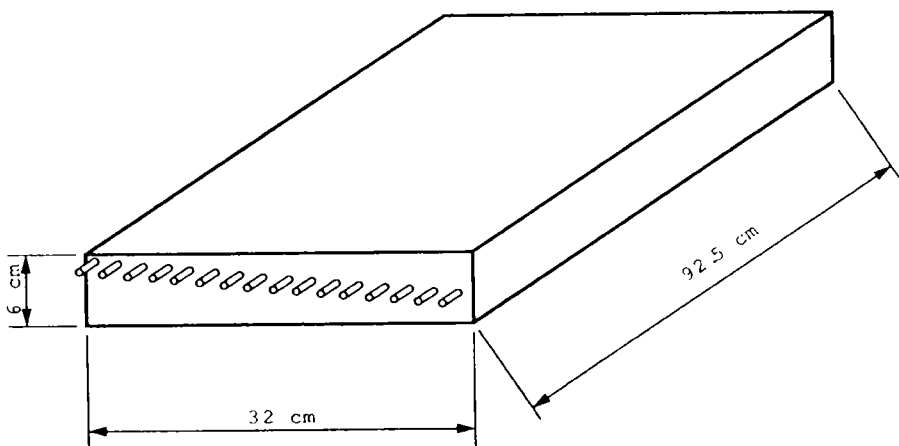


Abb. 1: Schematische Darstellung der verwendeten Probekörper

Fig. 1: Schematic representation of the test specimens

2.2 Probenvorbereitung

Zur Probenvorbereitung wurden die Probekörper halbiert und die Schalseiten bzw. die Schnittfläche der Probekörper mit Epoxidharz beschichtet. Um die Probekörper innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes carbonatisieren zu lassen, wurden die Proben gemäss einer TFB-Vorschrift schnellcarbonatisiert [9]. Der Fortgang der Carbonatisierung, vor allem die erreichte Carbonatisierungstiefe, wurde an unter gleichen Bedingungen gelagerten Referenzproben in zeitlichen Abständen von 2 Tagen überwacht. Bei beiden Mörtelproben wurde nach 14 tägiger Einwirkungsdauer eine Carbonatisierungstiefe von etwa 20 mm gemessen. Im Anschluss an die Carbonatisierung wurde eine beschleunigt ablaufende Korrosion der Bewehrung durch Anlegen einer elektrischen Gleichspannung ausgelöst. Dabei wurden die Bewehrungsstangen 1-10 als Anode, die unterste Bewehrungsstange 17 als Kathode geschaltet. Durch die in diesem elektrischen Feld schneller ablaufenden Ionentransporte und elektrochemischen Prozesse wird auch die Stahlkorrosion beschleunigt. Nach dieser anodischen Vorkorrosion wurde der Korrosionszustand der Bewehrung durch Messung der Korrosionspotentiale gegen eine Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode charakterisiert [10].

2.3 Applikation der Lithium-Verbindungen

Für die Versuche zur Realkalisierung mit Lithium-Salzen wurden die in der folgenden Tabelle 2 näher beschriebenen Lithium-Verbindungen ausgewählt. Für die Applikation wurden mit diesen Verbindungen wässrige Lösungen hergestellt, deren Konzentrationen ebenfalls in der Tabelle 2 aufgeführt sind. Diese Lösungen wurden ein- bzw. mehrmals auf die Oberfläche der unter einem Winkel von 45° gelagerten Probekörper drucklos appliziert. Die Menge der aufgenommenen Lösung wurde gravimetrisch bestimmt.

2.4 Durchgeführte Untersuchungen

2.4.1 Messung des Korrosionspotentials

An den realkalisierten Probekörpern wurden eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, deren wichtigste Ergebnisse aber hier nur behandelt werden können. Der Korrosionszustand der Bewehrung wurde nach der Applikation der Lithium-Verbindungen durch Messung der Korrosionspotentiale gegen eine Cu/CuSO₄-Elektrode bestimmt. Auf diese Weise wurde die repassivierende Wirkung der Lithium-Verbindungen charakterisiert.

| | Lithiumsilicat | Lithiumcarbonat | Lithiumhydroxid |
|---|---------------------------|-------------------------------|--|
| Aussehen | weisses Pulver | weisses, fein-körniges Pulver | weisses, feinkristallines Pulver |
| Formel | Li_2SiO_4 | Li_2CO_3 | $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ |
| Molekulargewicht [g/mol] | 89.97 | 73.89 | 41.96 |
| Spezifisches Gewicht [g/cm³] | 2.52 | 2.11 | 1.51 |
| Löslichkeit in Wasser [g/l] | 0.6 | 133 | 216 |
| Konzentration der verwendeten Lösung [g/l] | 0.6 | 66.5 | 108 |

Tabelle 2: Eigenschaften der verwendeten Lithium-Verbindungen und der damit hergestellten wässrigen Lösungen

Table 2: Properties of the used lithium compounds and lithium solutions

2.4.2 Bestimmung der Eindringtiefe und -menge der Lithium-Verbindungen

Zur Bestimmung der Eindringtiefe und der Menge an Lithiumsalzen wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 mm aus den Probekörpern entnommen. Diese Bohrkerne wurden in 10 mm dicke Scheiben geschnitten. Nach einer 24 stündigen Trocknung bei 105 °C wurden die Scheiben zermahlen. An der gemahlten Probe wurde ein Kaltwasseraufschluss durchgeführt und in der Lösung die Li-Ionenkonzentration mittels eines Ionenchromatographen quantitativ bestimmt.

2.4.3 Bestimmung mechanischer Eigenschaften

Nach [11] ist bekannt, dass bei Mörtel und Beton, der simultan einer mechanischen Belastung und einem chemischen Angriff ausgesetzt ist, die Schädigung des Werkstoffes weitaus schneller erfolgt, als bei Proben, die entweder nur der mechanischen oder nur der chemischen Belastung ausgesetzt sind. Die Wirkungen dieser kombinierten Belastung kann durch die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wie z.B. der Biegezugfestigkeit charakterisiert werden [12]. Dieses als Spannungskorrosion zementgebundener Werkstoffe bezeichnete Phänomen kann zur schnellen Charakterisierung der betonaggressiven Wirkung einer Chemikalie

herangezogen werden. Dazu werden Mörtelproben unter spannungskorrosiven Bedingungen gelagert und der Einfluss auf die mechanischen Größen wie Bruchenergie und Biegezugfestigkeit bestimmt. Durch den Vergleich mit Ergebnissen für in Wasser gelagerte Referenzproben kann die Wirkung der zu untersuchenden Chemikalie abgeschätzt werden. Eine genaue Darstellung dieser Untersuchungsmethode wird in [12] und [13] gegeben.

3. Ergebnisse

3.1 Korrosionspotentiale

Der Korrosionszustand der Bewehrung vor und nach der Applikation wurde durch Messen der Korrosionspotentiale gegen eine Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode charakterisiert. Zu diesem Zweck wurde zu verschiedenen Zeitpunkten für jede Bewehrungsstange das Korrosionspotential an 6 verschiedenen Positionen gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Abbildungen 2 und 3 als Funktion der Einbettungstiefe dargestellt. Die angegebenen Werte stellen dabei den Mittelwert aus den 6 Einzelmessungen dar.

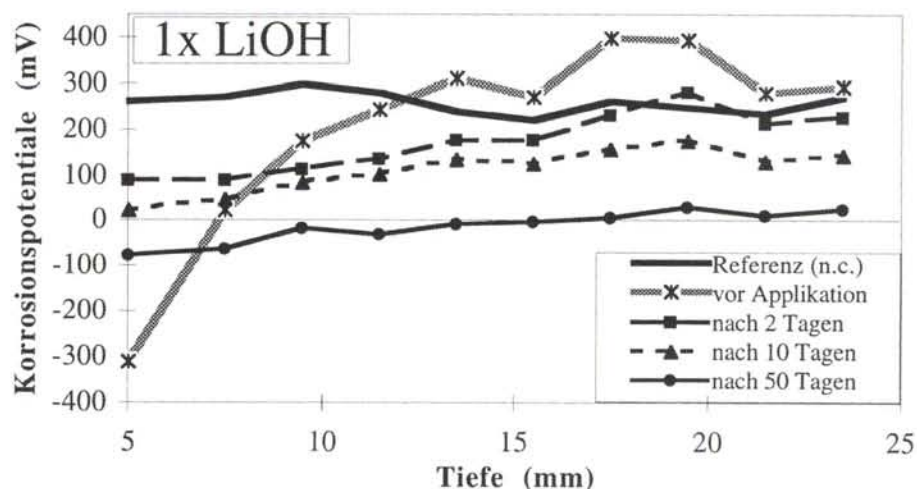


Abb. 2a: Korrosionspotentiale als Funktion der Einbettungstiefe der Stahlstangen für Probekörper mit einem W/Z-Wert=0.55, die einmal mit Lithiumhydroxid behandelt wurden (n.c. = nicht carbonatisiert)

Fig. 2a: Corrosion potential as function of the depth of the steel bars embedded in mortar with water-cement ratio of 0.55 after one treatment with LiOH.

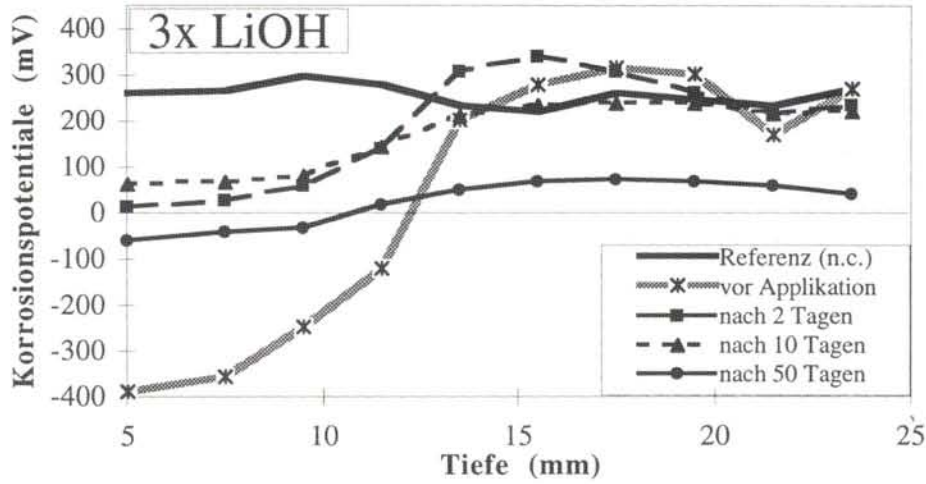


Abb. 2b: Korrosionspotentiale als Funktion der Einbettungstiefe der Stahlstangen für Probekörper mit einem W/Z-Wert=0.55, die dreimal mit Lithiumhydroxid behandelt wurden (n.c. = nicht carbonatisiert)

Fig. 2b: Corrosion potential as function of the depth of the steel bars embedded in mortar with water-cement ratio of 0.55 after three treatments with LiOH

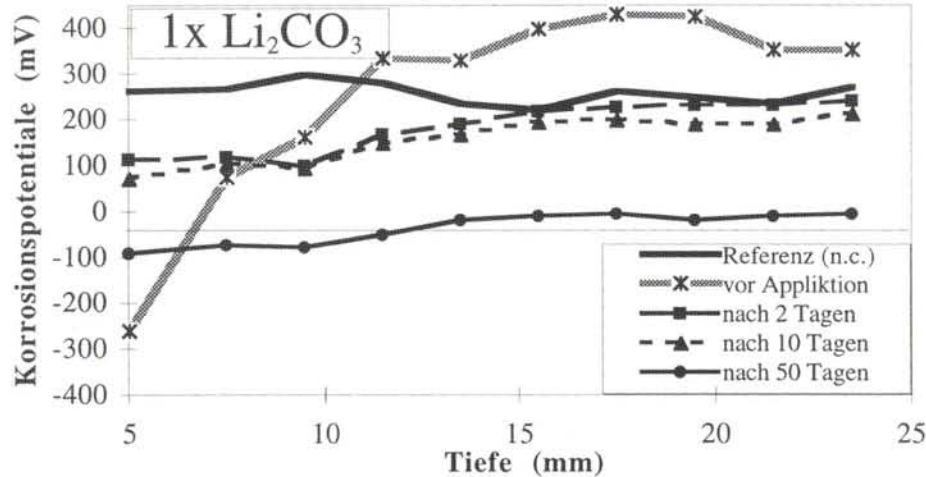


Abb. 3a: Korrosionspotentiale als Funktion der Einbettungstiefe der Stahlstangen für Probekörper mit einem W/Z-Wert=0.65, die einmal mit Lithiumcarbonat behandelt wurden (n.c. = nicht carbonatisiert)

Fig. 3a: Corrosion potential as function of the depth of the steel bars embedded in mortar with water-cement ratio of 0.65 after one treatment with Li₂CO₃

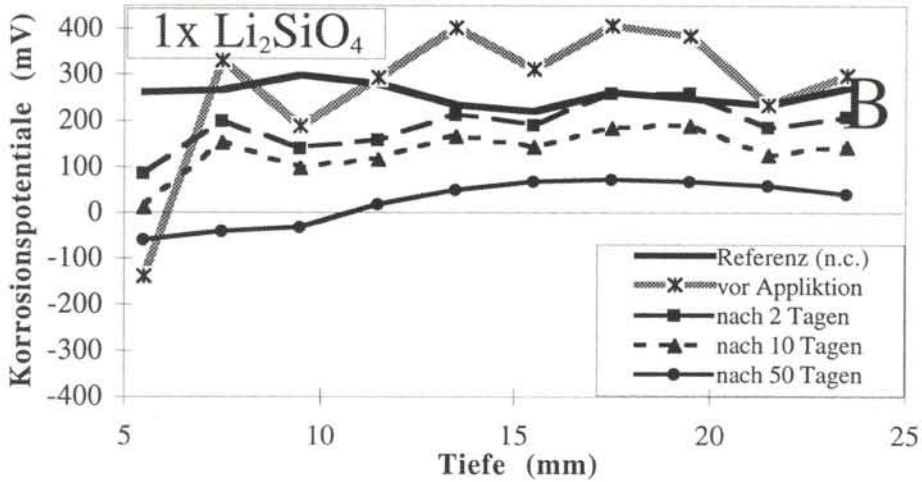


Abb. 3b: Korrosionspotentiale als Funktion der Einbettungstiefe der Stahlstangen für Probekörper mit einem W/Z-Wert=0.65, die einmal mit Lithium-silicat behandelt wurden (n.c. = nicht carbonatisiert)

Fig. 3b: Corrosion potential as function of the depth of the steel bars embedded in mortar with water-cement ratio of 0.65 after one treatment with Li_2SiO_4

3.2 Eindringtiefe der Lithium-Verbindungen

Die Eindringtiefe wurde durch Bestimmen des Lithium-Gehaltes als Funktion des Abstandes von der Oberfläche charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Bestimmungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Werte für die Mengen an Lithium beziehen sich auf die Einwaage an gemahlenem Mörtel. Zur besseren Beurteilung der Resultate sei darauf hingewiesen, dass die Nachweisgrenze für Lithium bei der in diesem Fall verwendeten Ionenchromatographie ca. 0.00001 Massen-% Lithium beträgt. Bei den Probekörpern, die nur einmal mit Lithiumhydroxid behandelt wurden, sind im Bereich von 0-10 mm ca. 0.002 Massen-% nachweisbar. Diese Werte sinken im Bereich von 10-20 mm auf Lithium-Gehalte von kleiner als 0.001 Massen-%. Im Vergleich dazu beträgt der Wert bei den dreimal behandelten Proben im Bereich von 0-10 mm ca. 0.05 Massen-% und im Bereich von 10-20 mm noch ca. 0.002 Massen-%. Damit ist der Wert bei den dreimal behandelten Proben um ein Vielfaches höher, als bei den Proben, die nur einmal behandelt wurden. Bei größeren Tiefen ist aber bei keinem der beiden Probekörpern noch Lithium nachweisbar. Das zeigt, dass durch eine Wiederholung der Applikation unter den im Experiment vorliegenden Bedingungen die vom Mörtel aufgenommene Menge an Lithiumhydroxid zunimmt, die Eindringtiefe aber nicht signifikant erhöht wird. Bei der Probenserie, die mit Lithiumcarbonat behandelt wurde, lässt sich nur im Bereich von 0-10 mm Lithium in einer Menge von ca. 0.001 Massen-% nachweisen.

Noch niedriger ist dieser Wert beim Lithiumsilicat. Dort wird nur im Bereich von 0-10 mm eine Menge von ca. 0.0007 Massen-% Lithium nachgewiesen. Die geringere Menge kann zum Teil auf die geringeren Konzentrationen der verwendeten Lithiumverbindungen in der applizierten Lösung zurückgeführt werden. Bei der Probe "Heuried" wurde in einem öffentlichen Schwimmbad versuchsweise eine gesättigte Lithiumhydroxid-Lösung (216 g/l LiOH) einmalig auf die carbonatisierte Betonwand eines Umkleideraumes appliziert. Nach der Applikation wurden Bohrkerns entnommen und in einem Raster von 5 mm abgefräst. In dem Betonmehl wurden neben anderen Größen die Lithium-Gehalte als Funktion der Tiefe aufgenommen. Die Lithium-Konzentration im Randbereich von 0-10 mm ist mit 0.04 Massen-% mit den Werten vergleichbar, die bei den dreimalig mit Lithiumhydroxid behandelten Laborproben festgestellt wurden. Der Konzentrationsabfall ist aber ausgeprägter als bei den Laborproben. Bereits nach ca. 10 mm ist kein Lithium mehr nachweisbar.

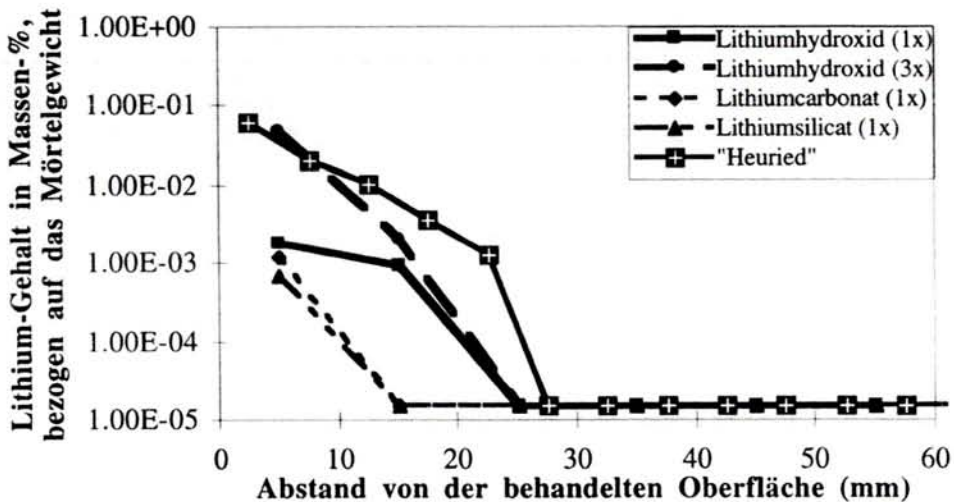


Abb. 4: Gehalt an Lithium als Funktion des Abstandes von der behandelten Probenoberfläche, bezogen auf das Mörtelgewicht

Fig. 4: Lithium concentration as function of the distance from the surface related to the mass of mortar

3.3 Betonschädigende Reaktionen

Die Frage der betonschädigenden Wirkung von Lithium-Verbindungen wurde an 28 Tage alten Mörtelproben untersucht. Dazu wurden die Proben 10 Tage in einer 10%igen Lösung des Lithiumhydroxids bzw. -chlorids gelagert. Zusätzlich zu dieser chemischen Belastung wurden die Proben mit 50 % der Biegezugfestigkeit in einem Dreipunktbiegeversuch mechanisch belastet. Ein Teil der Mörtelproben wurde zu Vergleichszwecken unter ansonsten gleichen Bedingungen in Wasser gelagert. Zur Charakterisierung der Wirkung der chemo-mechanischen Belastung wurde die Bruchenergie G_f und die maximale Bruchlast F_{max} bestimmt. Die Resultate sind in Tabelle 3 aufgeführt. Für die maximale Bruchlast F_{max} lässt sich, wie bei den Werten für die Bruchenergie G_f , zwischen den Werten der in Wasser gelagerten Referenzproben und der in Lithiumhydroxid gelagerten Proben kein statistisch signifikanter Unterschied feststellen. Im Gegensatz dazu ist der Wert für die maximale Bruchlast F_{max} bei den in Lithiumchlorid-Lösung gelagerten Proben um ca. 20 % höher. Die Bruchenergie G_f ist im Gegensatz dazu um ca. 15 % niedriger.

| Medium | Anzahl der Proben | Maximale Bruchlast F_{max} [N] | Anzahl der Proben | Bruchenergie G_f [N/m] |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Wasser | 4 | 469 | 3 | 52.9 |
| Lithiumchlorid | 4 | 585 | 3 | 44.0 |
| Lithiumhydroxid | 4 | 497 | 3 | 52.6 |

Tabelle 3: Mechanische Kenngrößen für die im Prüfstand für Spannungskorrosion getesteten Mörtelproben nach 10 Tagen Belastungsdauer

Table 3: Mechanical properties of mortar specimens after 10 days loading of 50 % of the ultimate load

4. Diskussion

Ausgehend von den vorliegenden Kenntnissen über die Carbonatisierung von Beton und dem Stand der Technik im Bereich der Realkalisierung wurde unter Verwendung verschiedener wässriger Lithium-Salzlösungen bewehrter Beton realkalisiert. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde dann geprüft, ob durch die Realkalisierung mit basischen Lithium-Verbindungen das alkalische Milieu des Betons wiederhergestellt und der Stahl repassiviert werden kann, um das Fortschreiten der Korrosion zu verhindern. Ergänzt wurden diese Laborexperimente durch die Analyse einer Versuchsapplikation, die unter praxisnahen Bedingungen in einem öffentlichen Schwimmbad erfolgte.

Die Realkalisierung mit Lithium-Verbindungen hat die Korrosionspotentiale in der Nähe der Oberfläche erhöht, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Stahloberfläche nicht weiter korrodiert. Die Eindringtiefe blieb unter 25 mm. In der Praxis findet man jedoch oft genug Carbonatisierungstiefen von bis zu 40 mm. Die gemessenen Eindringtiefen von ca. 25 mm bei Proben, die unter Praxisbedingungen im Schwimmbad angelegten Flächen entnommen wurden, deuten darauf hin, dass beispielsweise Grössen wie Porosität, Feuchtegehalt des Untergrundes oder Salzkonzentration einen grossen Einfluss auf die erzielbaren Eindringtiefen haben. Weitere Untersuchungen sind daher notwendig, um festzustellen, wie das Penetrationsverhalten der Lösungen optimiert werden muss, so das Eindringtiefen von über 40 mm erreichbar sind.

Die mechanischen Eigenschaften haben sich nach 10 tägiger Lagerung in Lithiumchlorid und Lithiumhydroxid unter 50 % der Bruchlast nicht signifikant geändert. Damit ist aber noch nicht der Beweis erbracht, dass keine werkstoffschädigenden Prozesse auftreten. Versuche mit wesentlich längeren Standzeiten sind hierzu noch notwendig, um auszuschliessen, dass beispielsweise eine "Lithium-Silica-Reaktion" den Beton zerstört.

5. Literatur

- [1] E. Koelliker, Die Carbonatisierung von Stahlbeton - ein Ueberblick, Beton- und Stahlbetonbau, **85**, 1990, 148-153, 186-189
- [2] B. Jungermann, Der Chemismus der Carbonatisierung von Beton, Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1982, 358-362
- [3] A. Gerdes und F.H. Wittmann, Modell zur Vorhersage der Langzeitbeständigkeit von Beton unter Einwirkung betonangreifender Wässer oder Kohlendioxid, in: F.H. Wittmann (Hrsg.), Berichtsband des 3. Internationalen Kolloquiums "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", 15.-17. Dezember 1992, Technische Akademie Esslingen, expert Verlag, 1453-1477
- [4] J. Mietz, B. Isecke, B. Jonas und F. Zwiener, Elektrochemische Realkalisierung zur Instandsetzung korrosionsgefährdeter Stahlbetonbauteile, in: F.H. Wittmann (Hrsg.), Berichtsband des 3. Internationalen Kolloquiums "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", 15.-17. Dezember 1992, Technische Akademie Esslingen, Expert Verlag, 655-665
- [5] J. Mietz, B. Isecke, B. Jonas und F. Zwiener, Elektrochemische Realkalisierung zur Instandsetzung korrosionsgefährdeter Stahlbetonbauteile, Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 03F615 A9, Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin 1994
- [6] J.A. Roti, Elektrochemische Verfahren zur Betoninstandstellung. Dauerhafte zerstörungsfreie Lösung des Korrosionsproblems in carbonatisierten Stahlbeton, Schweizer Ingenieur und Architekt, 1994, 304-309
- [7] K. Kazuo, S. Toshihiko, I. Hiroshi, H. Kenji and K. Matsuhiko, , Method for Preventing Rusting of Steel in Concrete, Patent JP 1298185, Onoda Cement Ltd., Japan
- [8] M. Raupach und W. Breit, Korrosionsverhalten von Stahl in Beton nach örtlichen Instandsetzungen, in: F.H. Wittmann (Hrsg.), Berichtsband des 3. Internationalen Kolloquiums "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", 15.-17. Dezember 1992, Technische Akademie Esslingen, expert Verlag, 726-744

- [9] Technische Forschungs- und Beratungsstelle der schweizerischen Zement-industrie (TFB) , Schnellverfahren zur Beurteilung der Betonkarbonatisierung, Cementbulletin, **56**, Nr. 8, TFB Wildegg, 1988
- [10] W. v. Baeckmann, W. Schwenk und w. Prinz (Hrsg.), Handbuch des katho-dischen Korrosionsschutzes, 3. Auflage, Verlag Chemie, Weinheim, 1989
- [11] U. Schneider und E. Nägele, The Influence of Mechanical Stresses on the Corrosion of Cementitious Materials, in: F.H. Wittmann, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Elsevier Verlag, 1986, Amsterdam, 31-41
- [12] E. Nägele, Spannungskorrosion zementgebundener Werkstoffe in wässrigen Salzlösungen Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4, Heft 100, VDI-Verlag, 1991, Düsseldorf
- [13] A. Gerdes, Influence of Stress Corrosion on Fracture Energy of Cementitious Materials, in: F.H. Wittmann (Hrsg.) Fracture Mechanics of Concrete Struc-tures, Aedificatio Verlag, Freiburg, 1995